ETUDE D'UNE SUSPENSION D'UN VEHICULE AUTOMOBILE ASSERVIE AU NIVEAU DES FORCES D'INERTIE TRANSVERSALES ET AUX CARACTERISTIQUES DE LA ROUTE

THESE NO 400 (1981)

PRESENTEE AU DEPARTEMENT DE MECANIQUE

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES TECHNIQUES

PAR

JEAN-DANIEL CHAPPUIS

Ingénieur-mécanicien EPFL

Originaire de Rivaz (VD)

acceptée sur proposition du jury :

Prof. M. Del Pedro, rapporteur
Prof. F. Pruvot, corapporteur
M. Bouthors, corapporteur

SOMMAIRE

Notations 6

1. Introduction 9

1.1. Suspension et tenue de route d'un véhicule automobile 9

1.2. But de l'étude 13

1.3. Sujet du travail

2. Etude de paramètres liés à un véhicule et à sa trajectoire 19

2.1. Trajectoire dans l'espace 19

2.2. Trajectoire circulaire dans un plan oblique 21

2.3. Valeurs limites de l'angle ξ 25

2.4. Vitesse du véhicule 31

2.5. Angle de gêne 34

3. Principe d'un compensateur d'inertie 41

3.1. Rôle du compensateur 41

3.2. Idées de principes d'un compensateur 41

3.3. Projet d'un compensateur 46

4. Conception d'un prototype 51

4.1. Choix d'un véhicule 51

4.2. Caractères spécifiques de la Citroën DS 21 52

4.3. Transformations de base du véhicule traditionnel 55

4.4. Circuit hydraulique du compensateur d'inertie 56

4.5. Détecteurs et organes de mesure 59

4.6. Photographies du prototype 62

5. Modèle mécanique d'un véhicule équipé de vérins correcteurs et parcourant une trajectoire dans l'espace 65

5.1. But du modèle 65

5.2. Description d'un véhicule 65

5.3. Description d'un modèle mécanique 66

5.4. Dynamique du véhicule 69

5.4.1. Energie cinétique T
5.4.2. Energie potentielle de gravité V
5.4.3. Energie potentielle élastique U
5.4.4. Fonction de dissipation S
5.4.5. Equations du mouvement

5.5. Vibrations libres amorties d'une automobile 94

5.6. Forces aux points d'appui 100

6. Réglage des boucles d'asservissement de hauteur de caisse 107

6.1. Boucles d'asservissement de hauteur de caisse 107

6.2. Réglage du système par le critère de Nyquist 113

6.3. Réglage du système par calcul analogique 118

7. Réglage du système complet du compensateur d'inertie 125

7.1. Rôle du modèle mécanique du véhicule et de son asservissement 125

7.2. Eléments de l'asservissement réalisé 126

7.2.1. Trajectoire du véhicule
7.2.2. Mouvements du pendule
7.2.3. Modèle mécanique du véhicule
7.2.4. Bloc de réglage

7.3. Mise en équations du système complet 132

7.4. Paramètres du modèle mécanique 137

7.5. Impératifs du réglage 139

8. Mesures effectuées 143

8.1. Objectif et programme des mesures 143
8.2. Tests du saut frontal 145
8.3. Tests de virage 152
8.4. Analyse des résultats 161

9. Analyse succincte de l'asservissement réalisé 163

9.1. But de l'analyse 163
9.2. Paramètres principaux de l'asservissement 165
9.3. Comportement du véhicule en virages 168
9.4. Confort des passagers 174
9.5. Tenue de route en virages 187

10. Perspectives de développement et d'application industrielle 193

11. Résumé et conclusions 199

ANNEXES 201

1. Virages et enchaînements 203

1.1. Essais et mesures 214

1.2. Résumé

2. Caractéristiques dynamiques du prototype DS 21 215

2.1. Dimensionnement général, poids et position du centre de gravité du prototype 217

2.2. Conception des suspensions 217

2.3. Détermination des caractéristiques dynamiques 217

2.4. Fréquences propres et coefficients d'amortissement 226

3. Dimensionnement du circuit de commande hydraulique 231

3.1. Les blocs de suspension 231

3.2. Choix des servovalves 232

3.2.1. Débits dans les vérins
3.2.2. Pression antagoniste sur les vérins
3.2.3. Choix d'une pression d'alimentation générale
3.2.4. Choix des servovalves

3.3. Circuit de commande hydraulique 242

3.3.1. Pompes hydrauliques
3.3.2. Réservoir
3.3.3. Tuyauteries
3.3.4. Conjoncteur-disjoncteur et accumulateur
3.3.5. Soupape de surpression

4. Détecteurs et organes de mesure 253

4.1. Pendule d'inertie 253

4.2. Capteurs de hauteur de caisse 258

4.3. Mesure de la vitesse du véhicule 263

5. Schéma électrique et commande du système d'asservissement 265

5.1. Schéma du câblage électrique 266

5.2. Boîte de commande 268

5.3. Calibration des organes de commande 275

5.4. Adaptation des paramètres et des impératifs du réglage 288

6. L'asservissement : son rôle, ses performances et son réglage 293

7. Programme FORTRAN 303

7.1. Equations du système d'asservissement 303

7.2. Transformation des équations d'ordre supérieur 304

7.3. Transformation des équations d'ordre un 310

7.4. Nouveau système transformé d'équations 310

7.5. Programme et mode d'emploi 312

Bibliographie 323

Curriculum Vitae 327

1. INTRODUCTION

1.1. Suspension et tenue de route d'un véhicule automobile

Le rôle premier de la suspension d'un véhicule automobile est de procurer le confort et de contribuer à la sécurité des occupants en isolant le véhicule des chocs engendrés par les inégalités de la route. En même temps, lors des accélérations, des décélérations, dans les virages et sous l'action de phénomènes extérieurs tels le vent, la suspension doit absorber les diverses forces qui s'exercent sur la caisse du véhicule.

Le deuxième rôle de la suspension est d'assurer le guidage des roues. La précision des"épures"qui déterminent le mouvement que les roues auront dans leur"débattement" est une nécessité découverte relativement récemment dans l'histoire de la technique automobile. Mais le mouvement d'une roue sous l'effet d'une bosse, d'une surcharge passagère, ne se fait jamais sans quelque altération de la géométrie de l'épure.

Il en résulte de nombreux problèmes de stabilité, de tenue de route, de confort et de sécurité, que le constructeur résout au mieux de ses possibilités, mais seulement au prix de nombreux compromis.

Une *"attitude"* particulière d'un véhicule automobile est son inclinaison transversale en virage. En parcourant une courbe, le véhicule subit l'influence de la force centrifuge. Il s'incline transversalement d'un angle communément appelé *"angle de roulis"*. L'importance du roulis dépend dans une large mesure de la position du centre de gravité et des centres instantanés de rotation des essieux. On désigne par *"centre instantané de rotation"* d'un essieu, le point autour duquel la carrosserie commence à s'incliner lorsque s'exerce sur elle la force centrifuge engendrée par le virage.

L'axe instantané de rotation

La ligne qui relie le centre instantané de rotation de l'essieu avant et celui de l'essieu arrière est appelé *"axe instantané de rotation"*.

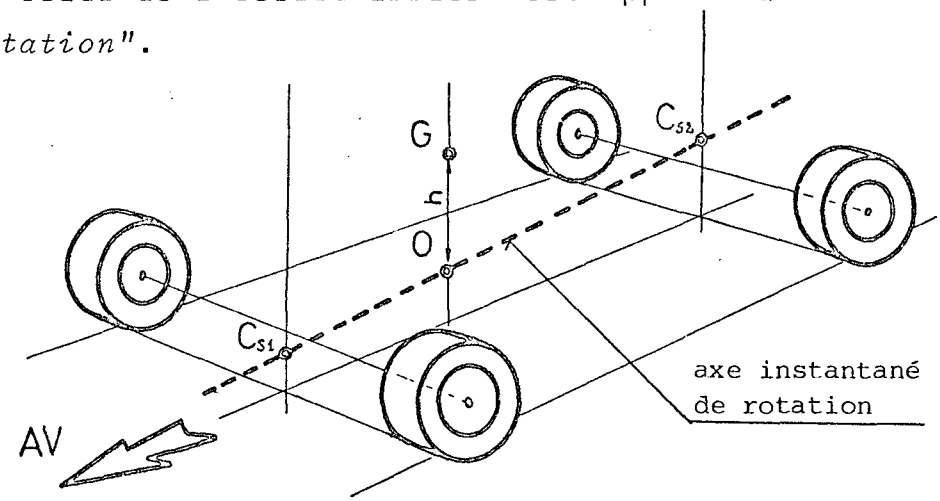

Fig.1.1 L'axe instantané de rotation

Plus la distance entre le centre de gravité et l'axe instantané de rotation est grande, plus le couple de roulis est fort; en d'autres termes, un axe instantané situé près du centre de gravité provoque un plus faible roulis qu'un axe situé plus loin. Mais à l'avantage d'un axe instantané haut placé s'oppose aussi un inconvénient: la force d'appui de la caisse sur le centre instantané de l'essieu provoque dans les virages une variation violente et rapide de charge sur les roues qui a pour effet d'altérer le guidage latéral des pneumatiques et nécessite par conséquent une diminution de la vitesse. Si le centre instantané est bas, en revanche, la force centrifuge provoque une inclinaison progressive de la carrosserie, qui se traduit par des variations moindres de la charge appliquée aux roues, permettant de prendre les virages à une vitesse plus élevée. Mais alors l'angle de roulis augmente considérablement, ce qui se traduit par un plus grand désagrément pour les occupants.

Le comportement autodirectionnel

Maintenant, que se passe-t-il au niveau du sol ? Jusqu'à la vi-

tesse limite dans un virage, ce sont les forces de guidage latéral des pneumatiques sur la chaussée qui s'opposent à un mouvement de dérapage.

Si une force transversale s'exerce sur un pneumatique, sa surface d'appui, approximativement elliptique, se déforme à cause de son élasticité : le pneumatique se déplace alors obliquement par rapport à la direction du véhicule, c'est-à-dire que son plan médian fait un angle avec la nouvelle direction : c'est *"l'angle de dérive"*.

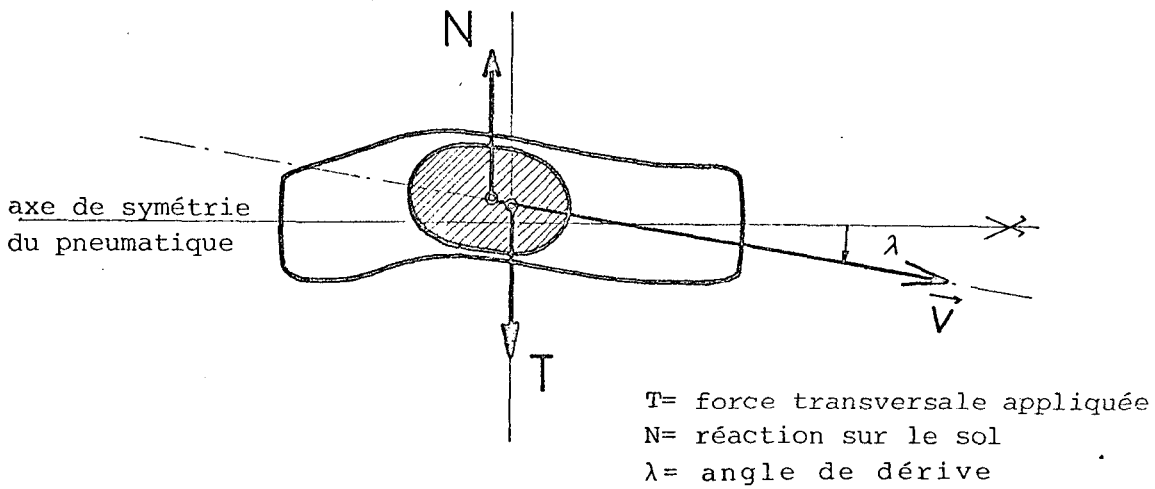

Fig.1.2 L'angle de dérive λ du pneumatique

Ce phénomène permet de comprendre le comportement en courbe d'un véhicule. Celui-ci est *"survireur"* si l'angle de dérive des roues avant est plus petit que celui des roues arrière, ce qui se traduit pour le véhicule par une tendance à se diriger vers l'intérieur du virage, à accentuer celui-ci et à déraper de l'arrière. A l'inverse, le véhicule est *"sousvireur"* si l'angle de dérive des roues avant est supérieur à celui des roues arrière, ce qui se traduit par une tendance, malgré un braquage correct des roues, à s'écarter de la trajectoire dé-

terminée et à"glisser"tout droit du train avant. Si les angles sont égaux, le véhicule a un comportement neutre. Dans les virages, un angle de dérive se manifeste aux quatre roues, de sorte que l'axe longitudinal du véhicule ne se déplace pas conformément à la tangente de la trajectoire, mais forme un angle appelé *"angle de glissement"*.

La barre stabilisatrice

Le choix des raideurs de suspension, des pressions des pneumatiques, peut avoir une grande influence sur le comportement autodirectionnel. Mais la répartition du poids joue un rôle déterminant en ce qui concerne la tenue dans les virages. Si l'on considère les deux essieux en même temps, la force centrifuge,agissant au centre de gravité,se décompose en deux forces au droit des essieux, proportionnelles à la répartition originale des masses. Les forces qui s'exercent sur les pneumatiques ne diffèrent pas seulement des roues avant aux roues arrière, mais surtout des roues intérieures aux roues extérieures à la courbe. Cette variation prend le nom de *"différence de charge"* des roues d'un essieu. Plus les différences de charge sont petites et plus leurs valeurs sont semblables sur les deux trains de roues, plus le véhicule peut atteindre des vitesses élevées dans les virages. En conséquence, on s'attache à limiter ces variations par des changements de conditions de charge des roues des essieux avant ou arrière.

Cette opération est réalisée de la façon la plus simple au moyen d'une *"barre stabilisatrice"*, généralement sous la forme d'une barre de torsion cylindrique,montée sur deux paliers perpendiculaires à l'axe longitudinal du véhicule,et ancrée de part et d'autre sur un organe mobile de chacune des suspensions.

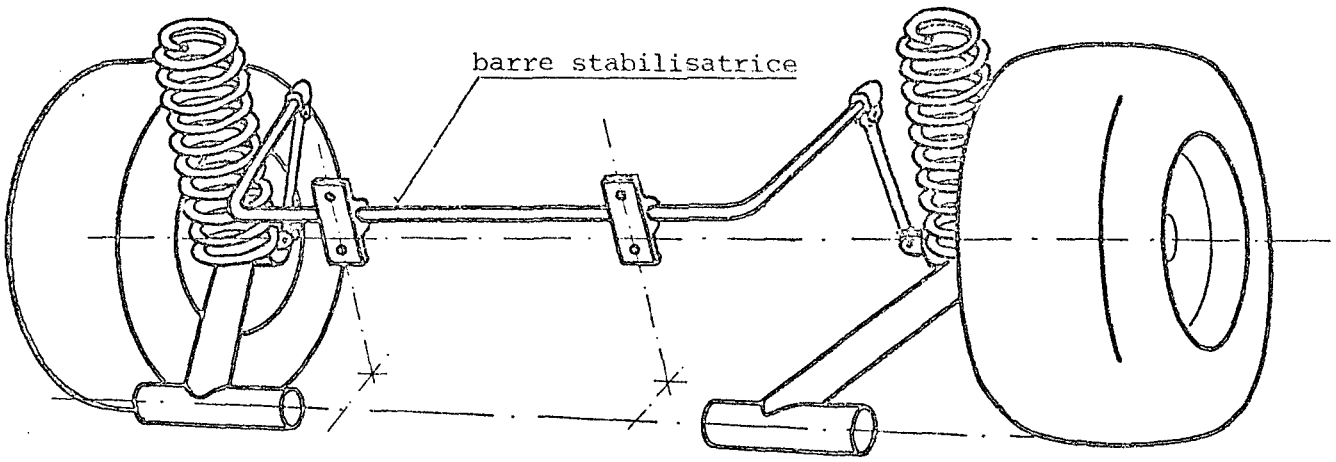

Fig.1.3 La barre stabilisatrice

La fonction de cette barre est de limiter la valeur du roulis sans modifier globalement la raideur verticale de la suspension. Mais surtout, la barre stabilisatrice modifie les aptitudes routières. L'emploi d'une barre sur l'un des essieux augmente la charge sur la roue extérieure au virage et la diminue sur la roue intérieure. La force supplémentaire imprimée à la roue extérieure lui donne un angle de dérive plus grand. Cette propriété permet d'atténuer plus ou moins une tendance au sur-ou souvirage.

1.2. But de l'étude

Au cours de l'évolution technique de l'automobile, le centre de gravité des véhicules a continuellement été abaissé. Le réseau routier s'est amélioré, les vitesses, et par conséquent les moyens réalisables, ont augmenté d'année en année, les pneumatiques ont fortement évolué. L'élévation de la puissance des moteurs a posé de nouveaux problèmes, en particulier celui de la transmission au sol de cette puissance. Et les exigences en matière de confort ont toujours crû. Les constructeurs se sont ainsi vus dans l'obligation de rechercher des compromis quant à la stabilité de trajectoire, la tenue de route, les valeurs de roulis, etc.

Par exemple, l'axe instantané de rotation, avec la généralisation des suspensions à roues indépendantes (du moins pour les trains avant), ne reste pas constamment à la même hauteur au-dessus du sol, et par conséquent, change continuellement les conditions de travail des pneumatiques. Les barres stabilisatrices, si elles sont favorables dans de nombreuses conditions en améliorant le comportement général, altèrent en fait le comportement du meilleur des deux trains de roues. De plus, elles sont parfois si rigides qu'elles s'opposent dans certaines conditions au bon fonctionnement des suspensions en produisant un balancement latéral ou *"roll-rock"*. Finalement, même plus ou moins atténué, le roulis subsiste toujours et demeure une source constante de désagréments pour les occupants du véhicule.

Toute solution destinée à améliorer la tenue de route ou le confort bute chaque fois sur la conception générale des suspensions, et l'on retombe finalement toujours sur les mêmes compromis. La seule façon de supprimer le problème consiste à reprendre entièrement cette conception de base.

La solution que nous proposons consiste à donner au véhicule une inclinaison transversale dirigée vers l'intérieur des virages, tout comme le motocycliste incline naturellement sa moto pour conserver un état d'équilibre.

La correction d'inclinaison peut être partielle ou totale. Elle est totale quand le support de la résultante des forces extérieures (force de pesanteur et force d'inertie transversale) se trouve confondu avec le plan médian longitudinal de symétrie du véhicule (fig. 1.4).

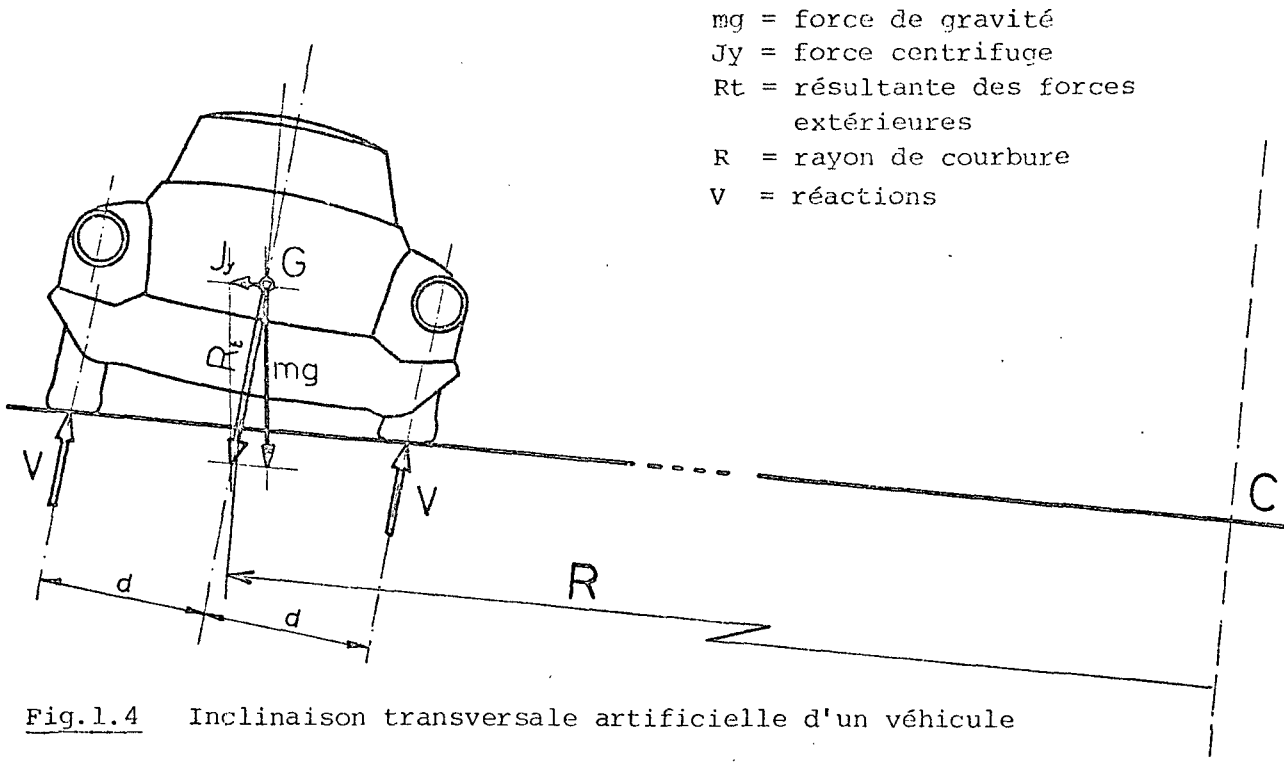

Fig.1.4 Inclinaison transversale artificielle d'un véhicule

Sur le plan tenue de route, la conséquence principale de cette correction d'inclinaison est une modification importante de la répartition des charges sur les roues. En virage, les roues intérieures d'un véhicule traditionnel sont délestées alors que les roues extérieures sont surchargées. A l'opposé, pour un véhicule dont l'inclinaison transversale est totalement corrigée, les roues intérieure et extérieure d'un même train sont toutes deux surchargées, d'une quantité approximativement égale.

De toute façon, que la correction d'inclinaison soit partielle ou totale, il va en résulter :

- une diminution des variations relatives de charge sur chacune des roues

- une diminution des transferts de charges des roues intérieures sur les roues extérieures aux virages ainsi que d'un train de roues sur l'autre.

Ainsi, les conditions d'adhérence devraient être favorisées et les effets de sur- ou sousvirage atténués. L'emploi de barres stabilisatrices devient inutile. La tenue de route devrait en être améliorée.

Mais c'est principalement sur le plan confort que l'on peut attendre les conséquences les plus favorables :

- Les modifications de la répartition des charges sur les roues doivent diminuer les risques de *"talonnage"*, autrement dit les risques d'arriver en butées de suspensions.

- Les efforts et accélérations transversaux sur les corps des occupants vont être fortement diminués ou même supprimés. Les passagers n'auront plus besoin de s'aggriper et de se contorsionner. Il devrait en résulter une forte diminution de la fatigue musculaire : le confort ne peut qu'être amélioré.

1.3. Sujet du travail

Notre travail consistait à montrer que l'idée d'incliner un véhicule vers l'intérieur des virages était applicable, que la solution choisie aboutissait à un système dynamiquement stable, et qu'un prototype réalisé selon cette idée apportait bien les avantages supposés.

L'étude a commencé par la détermination des paramètres importants liés au véhicule et à sa trajectoire : courbures, dévers, relations vitesse-rayon de courbure, inclinaison à donner au véhicule, etc. Puis un projet de compensateur d'inertie a été élaboré. L'ensemble véhicule-compensateur-trajectoire a été mis en équations pour être traité sur l'ordinateur Control Data CYBER 7328 du centre de calcul. Le programme ainsi conçu a permis d'étudier le comportement du véhicule équipé de son système de compensation sur des trajectoires de l'espace, parcourues à la vitesse désirée.

D'autre part, la construction et la mise au point d'un prototype, réalisé à partir d'un véhicule de série, ont permis d'abord de cerner et de mesurer tous les paramètres relatifs à un véhicule et à son comportement dans des conditions normales d'utilisation : constantes de rigidité, d'amortissement, moments d'inertie, fréquences d'enchaînement, temps de mise en virage, etc...

Puis, équipé de son compensateur d'inertie, le prototype a permis :

- de vérifier les résultats obtenus avec le modèle mécanique sur quelques trajectoires-type pour juger du bien-fondé de ce modèle;

- d'observer sur les occupants les effets physiologiques créés par un nouveau mode de conduite et une notion différente de confort;

- de constater enfin l'amélioration effective du confort et de la tenue de route.

Il ne nous était pas possible de construire un prototype entièrement nouveau, et nous avons utilisé comme base un véhicule CITROEN DS, choix nous paraissant le meilleur dans le cadre de notre réalisation. Lors de la conception, puis de la construction du système de compensation, nous avons choisi des solutions liées d'une part à ce choix et d'autre part au désir de pouvoir effectuer diverses mesures et de disposer de larges plages de réglage.

Dans le cadre d'une réalisation industrielle, ces solutions ne seraient certainement pas retenues. Non seulement la conception entière du compensateur serait à reprendre, mais surtout la technologie complète des suspensions serait à revoir en fonction des nouvelles exigences imposées.